doi:10.13866/j.azr.2018.04.01

西鄂尔多斯高原5种荒漠灌丛土壤碳排放特征[①]

王 珊[1,2]， 党晓宏[1]， 高 永[1,3]， 胡生荣[4]， 王则宇[1]， 潘 霞[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古财经大学资源与环境经济学院，内蒙古 呼和浩特 010010；3. 中央与地方共建风沙物理重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018；4. 内蒙古自治区环境工程评估中心，内蒙古 呼和浩特 010011）

摘 要：为了进一步厘定西鄂尔多斯高原地区5种天然荒漠灌丛土壤碳排放的主控因子，估算灌丛土壤碳排放量并阐明不同灌丛土壤的碳排放特征，选用5种典型荒漠灌丛林为研究对象，通过土壤碳通量ACE（automated soil CO_2 exchange station）监测系统分别测定了5种灌丛土壤呼吸速率、土壤温湿度及碳排放量。结果表明：① 5种灌丛土壤碳排放速率日动态总体呈现“不对称钟形”单峰曲线特性，峰值在11:30—13:30。5种灌丛生长季土壤碳排放速率均显著高于非生长季，其中半日花灌丛（*Helianthemum songaricum Schrenk*）比其他灌丛高0.76～1.67倍。土壤年均碳排放量沙冬青灌丛为8 090.63 kg·hm^{-2}·a^{-1}、四合木灌丛7 868.16 kg·hm^{-2}·a^{-1}、霸王灌丛7 287.40 kg·hm^{-2}·a^{-1}、半日花灌丛83 75.69 kg·hm^{-2}·a^{-1}和红砂灌丛7618.47 kg·hm^{-2}·a^{-1}；② 在3种未来气候情景（低排放情景B1、中等排放情景A1B和高排放情景A2）下，5种灌丛土壤碳排放量将比基准情景高达8.30%，其中霸王灌丛变化最为明显。不同类型灌丛地土壤碳排放对气温变化的响应存在差异，但差异不显著。本研究可为全球环境变化下中国西北干旱、半干旱地区碳平衡估算提供数据基础和参考依据。

关键词：土壤；荒漠灌丛；碳排放速率；气候情景；西鄂尔多斯高原

目前，全球变暖已成为热点环境问题，越来越受到重视，而大气中CO_2等温室气体浓度是反映全球变暖最直观和显著的指标[1-2]。土壤与大气CO_2交换过程主要是由土壤呼吸作用完成的[3-5]，因此，土壤呼吸对调控区域尺度上大气CO_2浓度有着十分重要的作用[6-8]。土壤呼吸是一个复杂的生化过程[9-10]，土壤呼吸不仅受土壤温湿度影响[11]，同时也受植被类型影响，如Raich等认为植物群落间土壤呼吸速率差异是由植物群落导致土壤微环境差异引起的[12]。因此，同一区域不同植被类型土壤呼吸的研究对于估算不同植被类型下土壤碳排放量、了解区域内地下碳分配特征及生态系统生产力评价具有十分重要的意义[13]。

西鄂尔多斯高原位于我国西北干旱区荒漠与草原过渡带，其在干旱、半干旱区土壤碳循环中占据着重要的生态位，同时由于脆弱的生态环境，当地植被以荒漠灌丛为主[14]。当地土壤碳排放特征对于气候、植被等环境因子具有很强的敏感性，但目前对该区域土壤呼吸及其影响因素还鲜有报道，对土壤呼吸在灌丛群落间的时空异质性认识不足，例如，土壤碳排放量在不同的灌丛群落间是否存在差异？影响土壤碳排放的关键性因子有哪些？这些都是明确西鄂尔多斯高原地区碳循环必须回答的科学问题。基于此，本研究以西鄂尔多斯高原地区荒漠与草原过渡带为研究区域，通过对5种典型天然荒漠灌丛地土壤呼吸速率以及土壤环境因子动态监测，分析灌丛地土壤呼吸时空动态特征，探明不同类型灌丛地土壤碳排放的动态特征及其关键性影响因子，以期为阐明全球气候变化下中国荒漠地区的生态系统碳排放规律提供理论依据。

1 研究区域及研究方法

1.1 研究区概况

西鄂尔多斯国家级自然保护区位于鄂尔多斯高原西缘至黄河东岸的狭长地带，地理坐标106°44′

① **收稿日期：**2017-09-19； **修订日期：**2018-02-02
基金项目：引进国外先进林业科学技术项目“人工调控荒漠灌丛生态空间构型技术引进（2015-4-22）”；内蒙古自治区自然基金项目“珍稀植物沙冬青根部菌群生长的作用机制（2015MS0301）”
作者简介：王珊（1986），女，副教授，从事荒漠化防治研究。呼和浩特，内蒙古农业大学，010010. E-mail：wangshan223@sina.com
通讯作者：高永. E-mail：13948815709@163.com

59.7″~107°43′12″ E,39°13′35″~40°10′50″ N,海拔1 000~2 100 m,总面积555 849 hm^2,位于亚洲荒漠的东端[15]。该区为草原化荒漠地带,地形多为低山丘陵。气候类型属暖温带大陆性季风气候,年均降水量不足155 mm,年潜在蒸发量3 400~3 500 mm,其湿润系数<0.13[16]。年内降水分配极不均匀,7—8月降水占全年降水的60%以上,地下水埋深距地表15 m以上,因此研究区内植物所需水分主要来源于天然降水[17],该区具有高原寒暑剧变,昼夜温差大,气候干燥,日照时间长,太阳辐射强,风大沙多等特点。研究区地带性土壤为漠钙土,植物种类贫乏,建群种多是强旱生灌木,其中有部分物种属于古老残遗濒危物种[18],主要优势灌丛种为沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、四合木(*Tetraena mongolica*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、西伯利亚白刺(*Nitraria sibirica*),而主要伴生植物有绵刺(*Potaninia mongolica*)、珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)等,表1为试验区灌丛样地基本情况。

表1 试验区灌丛样地调查统计表

Tab.1 The results of shrub sample plots survey in experimental area

灌丛种类	样地位置	丛高 H/cm	地径 D/mm	冠幅面积 C/m^2	生物量 G·丛$^{-1}$	表层土壤有机碳含量/($g\cdot kg^{-1}$)	生境
沙冬青	106°52′37.90″E 40°04′41.3″N	40~96	9.89~25.26	2.52~8.70	1 118.07±75.59	7.13±0.53	半固定沙地、流沙地
霸王	106°52′34.90″E 40°04′42.32″N	80~103	11.82~49.39	3.83~8.04	652.59±70.54	6.83±0.65	干旱沙地、覆沙地
四合木	106°55′05.75″E 40°03′48.44″N	17~52	1.13~5.72	1.33~3.36	1 320.06±104.33	9.51±0.81	草原化荒漠黄河阶地
半日花	106°55′14.62″E 40°03′41.87″N	11~19	8.55~16.25	0.08~0.19	326.12±20.75	6.20±0.58	石砾质山麓
红砂	106°55′19.69″E 40°03′37.67″N	30~44	9.16~32.6	0.82~2.31	97.00±6.21	8.14±0.74	半荒漠山地丘陵

注:C:冠幅面积($C=\pi\times C_l\times C_w$);$C_l$:灌丛最长轴;$C_w$:灌丛最短轴。

1.2 研究方法

基于典型样地的实测数据,结合回归及情景等分析方法,对研究区内5种典型天然优势荒漠灌丛地土壤碳排放速率及相关环境因子进行了监测。土壤呼吸速率测定是采用英国ADC公司生产的ACE土壤碳通量自动监测系统,分别于2014年7月1日和8月15日(夏季)、9月15日和10月20日(秋季)及2015年4月18日和5月1日(春季)每日7:00—20:00对5种荒漠灌丛地土壤呼吸速率进行同步测定,单次测量时长为30 min。分别以5种标准灌丛群落植株冠幅边缘下相对平坦地面为土壤呼吸观测点,每种灌丛样地监测3个样点。在测量24 h前剪除圈内植被地上部分并清除枯落物后,将直径30 cm、高8 cm的钢圈垂直缓慢压入4~5 cm土壤层,并保证土壤及植被根系结构的完整性。将土壤碳通量自动监测仪自带的水分和温度探头插入5 cm的土壤层中,同步测定土壤的温度和含水量[19]。为了保证研究结果的代表性,本研究选择监测日的天气均为晴朗无风或微风。

土壤碳排放速率(Rs)与土壤温度、土壤含水量间关系分别采用线性模型、指数模型、对数模型、多项式函数模型进行拟合,最后通过回归方程的极大似然值(AIC)判定拟合方程的优劣。

$$AIC=-2\ln(L)+2p \qquad (1)$$

式中:L为回归方程的极大似然函数;p为回归方程的独立参数个数;AIC值越小说明拟合方程越优。

1.3 数据处理

采用SPSS17.0及SAS 9.0软件对不同荒漠灌丛地不同时间土壤碳排放速率及相关环境因子进行单因素方差(ANOVA)及回归分析。不同时刻的土壤碳排放速率采用同一灌丛样地不同监测点土壤碳排放速率的均值表示,再以2个监测日平均值与当月天数(在此假设全月为晴朗天气)的乘积作为该季节土壤碳排放量,获得各季节土壤碳排放量数据[20],便可估算5种灌丛地土壤年碳排放的量。

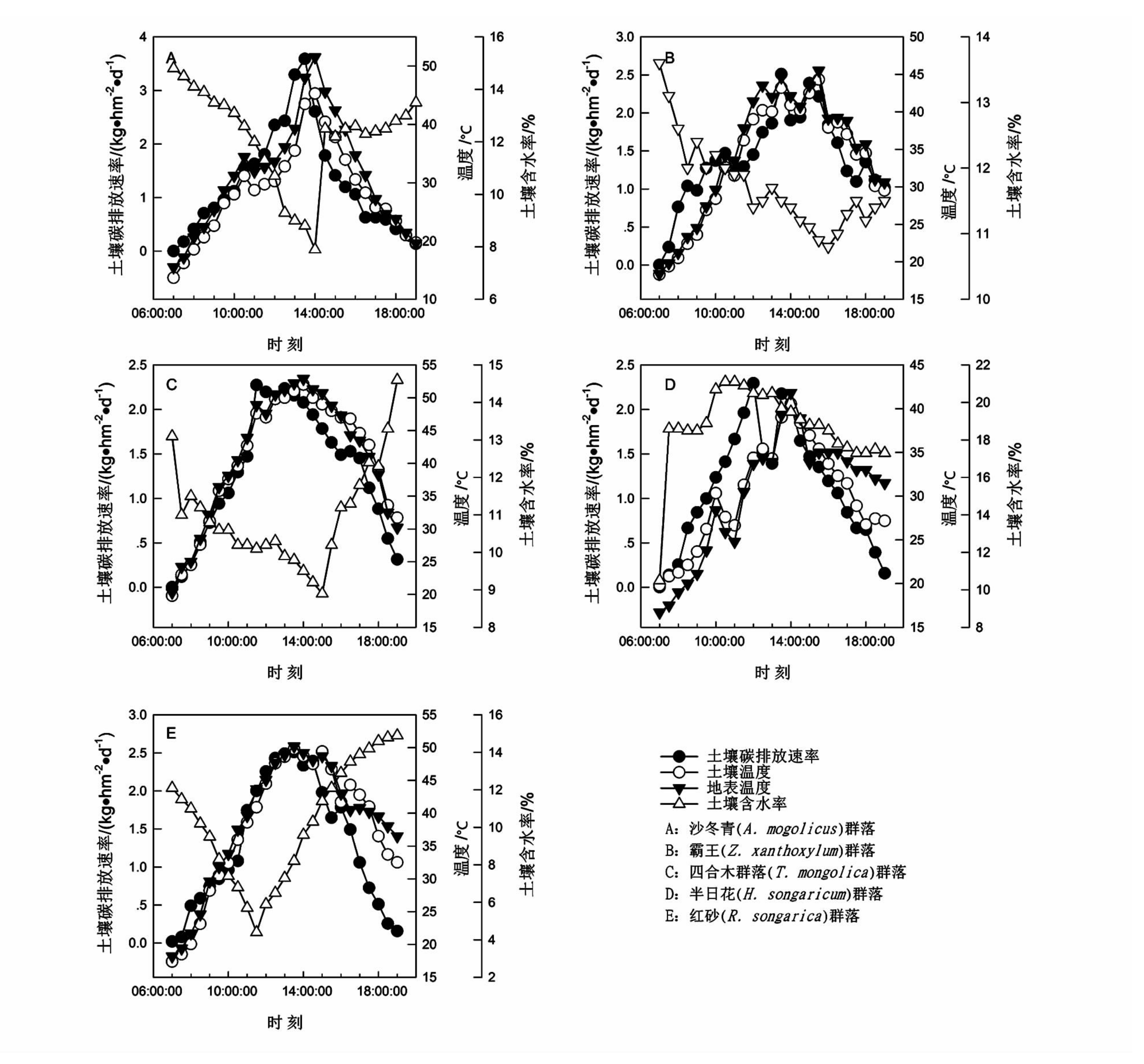


图 1　5 种荒漠灌丛地土壤碳排放速率及环境因子日动态

Fig. 1　Diurnal variation of soil carbon emission rate and environmental factors of five desert shrubs

2　结果与分析

2.1　5 种荒漠灌丛地土壤碳排放速率及环境因子日动态

图 1 为 5 种荒漠灌丛地土壤碳排放速率及环境因子日动态。从中可以看出:不同灌丛地土壤碳排放速率及土壤环境因子日变幅均存在差异,其中土壤日碳排放量变幅最大和最小值分别为沙冬青 (0 ~ 3.59 kg · hm^{-2} · d^{-1}) 和半日花 (0 ~ 2.29 kg · hm^{-2} · d^{-1})。5 种灌丛地土壤碳排放速率日动态曲线均呈现“单峰”形,除半日花和四合木灌丛地土壤碳排放速率在 11:30 和 12:00 最大外,其他荒漠灌丛土壤碳排放速率均在 13:30 达到峰值。整体上,5 种荒漠灌丛地日均碳排放量为霸王(1.40 kg · hm^{-2} · d^{-1}) > 红砂(1.30 kg · hm^{-2} · d^{-1}) > 四合木(1.28 kg · hm^{-2} · d^{-1}) > 沙冬青(1.26 kg · hm^{-2} · d^{-1}),半日花(1.12 kg · hm^{-2} · d^{-1})。

不同灌丛地间地表 5 cm 土壤最高温度存在一定差异,其中土壤温度最高和最低分别为四合木 52.0 ℃和半日花 39.8 ℃,其达到最高温度时间均在 14:00,霸王、红砂灌丛地最高土壤温度分别为 44.3 ℃和 49.8 ℃,其对应时间为 15:30 和 13:30。5 种灌丛地中,四合木灌丛日均土壤温度最高为 41 ℃,半日花最低为 33 ℃;而 5 种荒漠灌丛地中平均土壤含水量最高是半日花,其土壤平均含水量为 (0.187 ± 0.035) m^3 · m^{-3},其次为沙冬青灌丛(0.

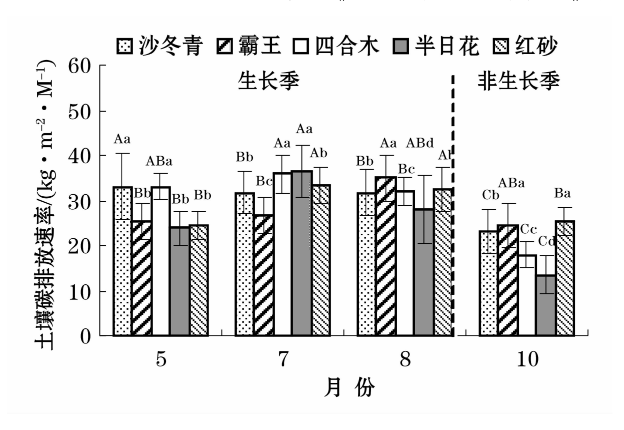
122 ±0.018) $m^3 \cdot m^{-3}$,红砂灌丛平均土壤含水量最低,为(0.103 ±0.012) $m^3 \cdot m^{-3}$。5 种荒漠灌丛地土壤含水量日变化规律与气温变化规律相反,且不同荒漠灌丛土壤含水量日变化趋势存在一定差异,其中红砂灌丛土壤含水量在 11:30 达到最低,而半日花灌丛土壤含水量在 18:00 达到最低,这是由于半日花群落地表石砾质覆盖,而砾石覆盖形成的干土层导致土壤水分运移特性不同于其他样地均质土壤,出现了表层土壤含水量与地表温度日动态规律相一致的现象[21]。

2.2 5 种荒漠灌丛土壤碳排放季节特征

西鄂尔多斯高原地区气候具有雨热同期的特点,其植物生长季为每年降雨较多的 5—8 月,非生长季为降雨较少的 10 月至次年 4 月。图 2 为西鄂尔多斯高原地区 5 种天然荒漠灌丛地不同季节土壤碳排放速率的比较。由图可知:5 种灌丛碳排放速率整体上在 7 月和 8 月较高,在 10 月较低,由此说明 5 种荒漠地土壤碳排放速率表现为生长季 > 非生长季。处于生长季中,同一灌丛地不同月份土壤碳排放速率存在显著差异,其中半日花、四合木和红砂灌丛土壤碳排放速率均在 7 月最大, 5 月最小。而沙冬青土壤碳排放率于 5 月达到最高值,霸王则在 8 月最大。5 种荒漠灌丛在同一月份的土壤碳排放率差异显著($P<0.05$)。

2.3 5 种荒漠灌丛在未来气候情景下的土壤碳排放特征分析

本文选用 IPCC 公布的《排放情景特别报告》中



注:图中不同大写字母表示同一灌丛地不同月份土壤碳排放速率间差异显著($P<0.01$),小写字母表示同一月份不同灌丛地土壤碳排放速率间差异显著($P<0.01$)。

图 2 西鄂尔多斯高原地区 5 种天然荒漠灌丛地土壤碳排放季节速率比较

Fig. 2 Comparison of soil carbon emission ratein different months of five desert shrubs in west Ordos region

的低排放情景 B1、中等排放情景 A1B 和高排放情景 A2 等 3 种未来气候情景作为模拟条件,以 6 a 间(2010—2015 年)的气候平均状态为基准,未来气候情景(B1,A1B,A2)的气温增加了 1.8 ℃、2.8 ℃和 3.4 ℃[22-23]。

温度是未来气候情景下主要变化因子,同时也是影响土壤碳排放速率的关键因子,表 2 以 5 种灌丛地土壤碳排放速率的日峰值为界限,将土壤碳排放速率和土壤表层温度进行分段拟合,同一层土壤温度情况下,上升阶段的土壤碳排放速率显著大于下降阶段($P<0.01$),导致这种现象是由于土壤日温度和土壤呼吸速率均呈现先升高后降低的趋势导致的时间滞后效应。同时,由于各灌丛地土壤碳排放速率对温度的敏感性不一致,而导致分段拟合的回归关系决定系数均好于整体拟合的回归关系,且 5 种灌丛整体拟合的最优回归关系也存在差异。其中沙冬青和霸王灌丛地土壤碳排放速率与表层土壤温度呈现二次函数关系,其决定系数 R^2 分别达到了 0.701 和 0.815 的极显著水平($P<0.01$);四合木和半日花灌丛地土壤碳排放速率与表层土壤温度呈现对数函数关系,其决定系数 R2 分别为 0.905 和 0.627,达到了极显著水平($P<0.01$),而红砂灌丛地土壤碳排放速率与表层土壤温度呈现幂函数关

表 2 土壤碳排放速率与土壤温度的回归方程

Tab. 2 Regression equations of soil carbon emission rate and soil temperature

灌丛类型	阶段	拟合方程	R^2	F	P
沙冬青 *A. mogolicus*	总体	$y=0.0001x^2+0.0824x-1.3737$	0.701	814.06	<0.001
	上升阶段	$y=0.0009x^2+0.0637x-1.1912$	0.912	1 094.35	<0.001
	下降阶段	$y=0.0431e^{0.0874x}$	0.896	940.65	<0.001
霸王 Z. xanthoxylum	总体	$y=0.0007x^2+0.0227x-0.192$	0.815	736.58	<0.001
	上升阶段	$y=1.948\ln(x)-5.3277$	0.820	811.5	<0.001
	下降阶段	$y=0.1749e^{0.0585x}$	0.861	948.29	<0.001
四合木 *T. mongolica*	总体	$y=0.0713x-1.6005$	0.905	980.72	<0.001
	上升阶段	$y=2.5699\ln(x)-7.9738$	0.934	1 420.53	<0.001
	下降阶段	$y=0.0269e^{0.086x}$	0.960	1 780.69	<0.001
半日花 *H. songaricum*	总体	$y=1.949\ln(x)-5.2787$	0.627	315.62	<0.001
	上升阶段	$y=2.3\ln(x)-6.1527$	0.824	795.49	<0.001
	下降阶段	$y=3.0055\ln(x)-9.1886$	0.935	1 210.35	<0.001
红砂 *R. songarica*	总体	$y=9E-06x^{3.1893}$	0.705	683.25	<0.001
	上升阶段	$y=0.0778x-1.3449$	0.964	1 890.58	<0.001
	下降阶段	$y=0.0018e^{0.1487x}$	0.900	1 150.34	<0.001

系,其决定系数 R^2 也是达到了 0.705 的极显著水平($P<0.01$)。

通过监测数据中土壤温度与气温间的关系来分别建立 5 种荒漠灌丛地土壤碳排放与气温间的拟合方程:

$$T_a=0.38T+2.53,\ R^2=0.81,\ P<0.05 \quad (2)$$

$$T_b=0.45T+2.85,\ R^2=0.73,\ P<0.05 \quad (3)$$

$$T_c=0.57T+3.28,\ R^2=0.79,\ P<0.05 \quad (4)$$

$$T_d=0.26T+1.84,\ R^2=0.91,\ P<0.05 \quad (5)$$

$$T_e=0.31T+4.50,\ R^2=0.87,\ P<0.05 \quad (6)$$

式中:T_a、T_b、T_c、T_d、T_e 为沙冬青、霸王、四合木、半日花及红砂等 5 种荒漠灌丛的土壤温度(℃);T 为气温(℃)。

通过拟合 5 种荒漠灌丛地土壤碳排放速率与气温的关系,即可间接模拟出在不同未来气候情景下的土壤全年碳排放速率的演变规律,将公式(2)~(6)代入到表 2 中 5 种荒漠灌丛与温度总体回归方程中即可实现。

由表 3 可知:沙冬青灌丛地在未来不同气候情景下(B1,A1B 和 A2),土壤碳排放量将分别比基准情景高出 6.66%、6.72% 和 6.77%;霸王灌丛地将分别高出 8.03%、8.20% 和 8.30%;四合木灌丛地将分别高出 6.61%、6.74% 和 6.81%;半日花灌丛地将分别高出 5.86%、5.93% 和 5.98%;红砂灌丛地将分别高出 5.84%、5.99% 和 6.07%。

表 3　不同气候情景下西鄂尔多斯高原地区 5 种荒漠灌丛地年土壤碳排放量

Tab. 3　Annual soil carbon emission in five desert shrub forest under future climate scenarios

/(kg · hm⁻² · a⁻¹)

灌丛类型	Baseline	B1	A1B	A2
沙冬青 *A. mogolicus*	8 090.63	8 629.52	8 634.68	8 638.00
霸王 *Z. xanthoxylum*	7 287.40	7 872.58	7 884.86	7 892.28
四合木 *T. mongolica*	7 868.16	8 388.61	8 398.24	8 404.02
半日花 *H. songaricum*	8 375.69	8 866.34	8 872.49	8 876.16
红砂 *R. songarica*	7 618.47	8 063.59	8 074.72	8 081.29

注:Baseline 和 B1、A1B、A2 分别代表基准情景和未来低排放情景(增温 1.8 ℃)、中等排放情景(增温 2.8 ℃)和高排放情景(增温 3.4 ℃)。

3　讨论

3.1　土壤碳排放强度

不同荒漠灌丛土壤碳排放速率存在一定差异,其中霸王灌丛地土壤日平均碳排放速率最大,为 1.40 kg · hm⁻² · d⁻¹,半日花灌丛地土壤平均碳排放速率最小为 1.12 kg · hm⁻² · d⁻¹,而刘允芬等[24]研究青藏高原东部退化草甸、退化灌丛和退化蒿草群落土壤碳排放量分别为 13.74 kg · hm⁻² · d⁻¹、12.35 kg · hm⁻² · d⁻¹和 8.99 kg · hm⁻² · d⁻¹,这表明植被类型(根系的分布和植被的覆盖度)是影响土壤碳排放强度的主导因素。而夏冰等对 4 种园林植物土壤碳排放研究也发现,相同时间 4 种园林植物土壤碳排放速率表现出一定的差异性,4 种园林植物土壤呼吸同时受土壤温度、湿度、养分及酶活性的影响[25]。唐洪松等认为新疆草地土壤具有碳汇作用,其草地碳排放系数为 -1.06 kg · hm⁻² · d⁻¹,这说明土地利用类型不同导致土壤碳排放速率存在显著差异[26]。李卫朋等研究认为峨眉冷杉林区成熟林土壤碳排放量日均值为 24.57 kg · hm⁻² · d⁻¹[27]和牛亚毅等[28]研究沙质草地生态碳排放速率为 14.2 kg · hm⁻² · d⁻¹,这一结果表明林区土壤碳排放速率高于草地和荒漠;冯薇估算毛乌素沙地生物结皮中藻结皮、地衣结皮和苔藓覆被区土壤碳排放量分别为 203.27 g · hm⁻² · a⁻¹、235.81 g · hm⁻² · a⁻¹和 193.93 g · hm⁻² · a⁻¹[29],这明显低于本研究中 5 种灌丛地土壤碳排放速率。

3.2　土壤碳排放速率时间动态

土壤呼吸速率在很大程度上决定了土壤碳排放速率,西鄂尔多斯 5 种荒漠灌丛土壤碳排放速率日变化整体上均呈单峰曲线形式,最大值均出现在 12:00—14:00,最小值均出现在 7:00 左右。土壤碳排放季节性波动较大,夏季碳排放速率较高,春秋季较低。这一结果与马文瑛等研究黑河天涝池祁连圆柏林土壤呼吸速率在 13:00 时达到最大值之外,干草原、亚高山草原、青海云杉林亚高山灌丛林均在 14:00 时达到最大值,且仅亚高山草原土壤碳排放速率为单峰曲线,其他 4 种植被类型均呈现波动曲线特征[30],但与牛亚毅等研究沙质草地生态系统碳排放季节特征一致,均表现为 9 月碳排放速率最大[28]。土壤的呼吸主要是植物根部及土壤微生物的呼吸,而无论是植物根的呼吸还是土壤微生物的呼吸,都是酶促作用的结果,随着昼夜或季节的改变,土壤温度、含水量等环境因子也随外界条件的变化而变化,使得酶促反应的各种酶类活性不同,酶促反应的速度和程度也就不同,从而导致土壤呼吸强度的日动态及季节动态的差异[31]。

3.3 未来气候情景下土壤碳排放速率

荒漠地区生态环境极为脆弱,易受气候变化干扰[32],因此其土壤呼吸易受环境变化而影响,故荒漠地区土壤碳排放速率已成为目前荒漠生态学研究的重要指标[33]。Luske 等[34]认为,荒漠地区与其他类型生态系统土壤相比可能具有碳汇作用。本研究通过对土壤温度和气温间关系进行拟合,并进一步模拟未来 3 种气候情景条件(B1,A1B 和 A2)下,西鄂尔多斯高原 5 种荒漠灌丛地土壤碳排放速率变化情况发现,5 种灌丛地土壤碳排放速率均会有一定程度的增加。而 Updegraff 等[35]研究也发现,阿拉斯加冻原生态系统 CO_2 排放速率随温度升高而增加,同时本研究发现,增温条件下 5 种荒漠灌丛地间的影响虽有差异但并不显著,这与 Xia 等[36]研究发现的温带草地生态系统增温条件下,生长季草地生态系统呼吸并无显著影响和 Lin 等[37]研究发现青藏高原区增温 1.2 ~1.5 ℃,对高寒草甸生态系统呼吸无显著影响的结论相似。其原因是在不受土壤水分条件限制情况下,增温提高了土壤微生物的活性,而土壤微生物活性的增加有利于土壤有机碳分解,因此增温促进了土壤碳排放[38]。但是,土壤含水量也会随着温度的升高而有所下降,导致土壤碳排放速率受到一定程度的限制。综上所述,由于生态系统及其地带性的不同,增温对生态系统的影响也会有所差异。本研究测定了西鄂尔多斯高原地区 5 种荒漠灌丛地土壤整体呼吸速率,但并没有对植物根系呼吸及微生物呼吸分开测定,因此,今后的研究中会进一步探索土壤微生物及植物根系呼吸在整个土壤呼吸过程中所起的作用;同时由于实验地较为偏僻,测量条件不便等客观原因,本实验并没有对夜间及冬季灌丛地土壤碳排放过程进行实时监测和分析,因此在今后试验条件允许情况下,应尽可能对研究区土壤碳排放进行长期连续监测,这样可以在一定程度上增强信噪比,进而使得该区碳排放的估算精度能够进一步提高。

4 结 论

(1) 西鄂尔多斯高原地区 5 种天然优势荒漠灌丛地土壤碳排放速率日变化曲线特征总体上均呈不对称钟形单峰曲线,灌丛地土壤碳排放速率最大值均出现在 11:30—13:30;且其土壤碳排放速率季节变化均表现为生长季显著高于非生长季,其中半日花灌丛地可高出 0.76 ~1.67 倍;5 种荒漠灌丛地土壤年均碳排放量分别为:沙冬青灌丛 8 090.63 kg · hm^{-2} · a^{-1}、霸王灌丛 7 287.40 kg · hm^{-2} · a^{-1}、四合木灌丛 7 868.16 kg · hm^{-2} · a^{-1}、半日花灌丛 8 375.69 kg · hm^{-2} · a^{-1} 和红砂灌丛 7 618.47 kg · hm^{-2} · a^{-1}。

(2) 沙冬青灌丛在未来不同气候情景下(B1,A1B 和 A2),土壤碳排放量将分别比基准情景高出 6.66%、6.72% 和 6.77%;霸王灌丛地将分别高出 8.03%、8.20% 和 8.30%;四合木灌丛地将分别高出 6.61%、6.74% 和 6.81%;半日花灌丛地将分别高出 5.86%、5.93% 和 5.98%;红砂灌丛地将分别高出 5.84%、5.99% 和 6.07%。不同类型灌丛地土壤碳排放对气温变化的响应存在差异,但差异不显著,其中霸王灌丛对气温变化最为敏感。

参考文献(References):

〔1〕 Fang J Y,Zhu J L,Wang S P,et al. Global warming,human - induced carbon emissions,and their uncertainties〔J〕. Science China Earth Sciences,2011,54(10):1 458 -1 468.

〔2〕 於琍,朴世龙. IPCC 第五次评估报告对碳循环及其他生物地球化学循环的最新认识〔J〕. 气候变化研究进展,2014,10(1):33 -36.〔Yu Li,Pu Shilong. Key scientific points on carbon and other biochemical cycles from the IPCC fifth assessment report〔J〕. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis,2014,10(1):33 -36.〕

〔3〕 Singh J S,Gupta S R. Plant decom position and soil respiration in terrestrial ecosystems〔J〕. The Botanica Review,1977,43(4):449 -528.

〔4〕 冯朝阳,吕世海,高吉喜,等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究〔J〕. 北京林业大学学报,2008,30(2):20 -26.〔Feng Chaoyang,Lv Shihai,Gao Jixi,et al. Soil respiration characteristics of different vegetation types in the mountain areas of north China〔J〕. Journal of Beijing Forestry University,2008,30(2):20 -26.〕

〔5〕 李君剑,温亮,韩广,等. 山西省孝义矿区不同植被恢复方式下土壤呼吸、温度和水分季节特征〔J〕. 水土保持通报,2012,32(3):56 -61.〔Li Junjian,Wen Liang,Han Guang,et al. Seasonal characteristics of soil respiration,temperature and moisture under different regeneration scenarios in Xiaoyi mining area of Shanxi Provience〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation,2012,32(3):56 -61.〕

〔6〕 孟祥利,陈世平,魏龙,等. 库布齐沙漠油蒿灌丛土壤呼吸速率时空变异特征研究〔J〕. 环境科学,2009,30(4):1 152 -1 158.〔Meng Xiangli,Chen Shiping,Wei Long,et al. Temporal and spatial variations of soil respiration in an Artemisia ordosica shrubland ecosystem in Kubuqi Desert〔J〕. Environmental Science,2009,30(4):1 152 -1 158.〕

〔7〕 高艳红,刘立超,贾荣亮,等. 沙坡头人工植被演替过程的土壤呼吸特征〔J〕. 生态学报,2012,32(8):2 474 -2 482.〔Gao

Yanhong,Liu Lichao,Jia Rongliang,et al. Soil respiration patterns during restoration of vegetation in the Shapotou area,Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(8):2 474 – 2 482.]

[8] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸[J]. 生态学报,2008,28(5):1 911 – 1 922.[Zhang Lihua,Chen Yaning,Li Weihong,et al. Soil respiration in desert ecosystem of the arid region[J]. Acta Ecologica Sinca,2008,28(5):1 911 – 1 922.]

[9] 张东秋,石培礼,张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(7):778 – 785.[Zhang Dongqiu,Shi Peili,Zhang Xianzhou. Some advance in the main factors controlling soil repiration[J]. Advances in Earth Science,2005,20(7):778 –785.]

[10] 鲍芳,周广胜. 中国草原土壤呼吸作用研究进展[J]. 植物生态学报,2010,34(6):713 –726.[Bao Fang,Zhou Guangsheng. Review of research advances in soil respiration of grassland in China[J]. Acta Phytoecologica Sinica,2010,34(6):713 –726.]

[11] 陈书涛,刘巧辉,胡正华,等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学,2013,34(3):1 017 – 1 025.[Chen Shutao,Liu Qiaohui,Hu Zhenghua,et al. Factors influencing the spatial variability in soil respiration under different land use regimes[J]. Environmental Science,2013,34(3):1 017 – 1 025.]

[12] Raich J W,Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration:Correlations and controls[J]. Biogeochemistry,2000,48(1):71 –90.

[13] Tang J W,Baldocchi D D. Spatial – temporal variation in soil respiration in an oak – grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components[J]. Biogeochemistry,2005,73(1):183 –207.

[14] West N E,Stark J M,Johnson D W,et al. Effects of climatic change on the edaphic features of arid and semiarid lands of western North America[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation ,1994,8(4):307 –351.

[15] 王乐,赵丽清,陈育,等. 西鄂尔多斯草原化荒漠植物群落多样性[J]. 干旱区研究,2015,32(2):258 – 265.[Wang Le,Zhao Liqing,Chen Yu,et al. Plant community diversity of steppification desert in west Ordos[J]. Arid Zone Research,2015,32(2):258 – 265.]

[16] 包萨如拉,赵利清,朴顺姬,等. 西鄂尔多斯维管植物区系特征分析[J]. 中国沙漠,2012,32(2):428 –436.[Bao Sarula,Zhao Liqing,Pu Shunji,et al. Floristic characteristics of vascular plants in west Ordos[J]. Journal of Desert Research,2012,32(2):428 – 436.]

[17] 额尔敦格日乐. 3S 技术在西鄂尔多斯国家级自然保护区研究中的应用[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2007.[Eerdun Gerile. Application of 3S Technology in the Study of West Erdos National Nature Reserve[D]. Huhhot:Inner Mongolia Normal University,2007.]

[18] 李博,史培军,李天杰,等. 内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境研究[M]. 北京:科学出版社,1990:90 –93.[Li Bo,Shi Peijun,Li Tianjie,et al. Natural and Environmental Research of Ordos Plateau in Inner Mongilia[M]. Beijing:Science Press,1990:90 – 93.

[19] Hanson P J,Edwards N T,Carten C T,et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration:A review of methods and observations[J]. Biogeochemistry,2000,48(1):115 – 146.

[20] 刘殿君,吴波,李永华,等. 极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放[J]. 生态学报,2012,32(17):5 396 – 5 404.[Liu Dianjun,Wu Bo,Li Yonghua,et al. Rain enrichment – accelerated carbon emission from soil in a Nitraria sphaerocarpa community in hyperarid region[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(17):5 396 –5 404.]

[21] 余海龙,黄菊莹. 砂田砾石覆盖对土壤大孔隙特征及其土壤水文过程的影响研究进展[J]. 水土保持研究,2012,19(4):284 –288.[Yu Hailong,Huang Juying. Research progress of influence of mulching gravel and sand on soil macropore characteristics and soil hydrological progress of gravel – sand mulch field[J]. Research of Soil and Water Conservation,2012,19(4):284 –288.]

[22] Lu X Y,Cheng G W. Climate change effects on soil Carbon dynamics and greenhouse gas emissions in Abies fabri forest of subalpine,Southwest China[J]. Soil Biology and Biochemistry,2009,41(5):1 015 –1 021.

[23] IPCC. Climate Change 2007:The physical science basis:Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2007.

[24] 刘允芬,欧阳华,曹广民,等. 青藏高原东部生态系统土壤碳排放[J]. 自然资源学报,2001,16(2):152 – 160.[Liu Yunfen,Ouyang Hua,Cao Guangmin,et al. Soil carbon emission from ecosystem of eastern Qinghai – Tibet plateau[J]. Journal of Natural Resource,2001,16(2):152 –160.]

[25] 夏冰,司志国. 不同园林植物土壤呼吸及影响因子特征[J]. 水土保持研究,2017,24(5):240 –246.[Xia Bing,Si Zhi Guo. Soil respiration and impact factors of diffenert green plants in Zhengzhou City[J] Research of Soil and Water Conservation,2017,24(5):240 –246.]

[26] 唐洪松,马慧兰,苏洋,等. 新疆不同土地利用类型的碳排放与碳吸收[J]. 干旱区研究,2016,33(3):486 –492.[Tang Hongsong,Ma Huilan,Su Yang,et al. Carbon emisson and carbon absorptions of different land use types in Xinjiang[J]. Arid Zone Research,2016,33(3):486 –492.]

[27] 李卫朋,孙建,沙玉坤,等. 西南地区亚高山典型林区土壤碳排放及影响因子[J]. 农业工程学报,2015,31(1):255 –263.[Li Weipeng,Sun Jian,Sha Yukun,et al. Carbon emission and its influence factors of subalpine forest soil in Southwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(1):255 –263.]

[28] 牛亚毅,李玉强,龚相文,等. 沙质草地生长季生态系统碳净交换量特征及土壤呼吸贡献率[J]. 生态学杂志,2017,36(9):2 423 – 2 430.[Niu Yayi,Li Yuqiang,Gong Xiangwen,et al,The characteristics of net ecosystem carbon exchange and the contribution of soil respiration during the growing season in sandy grassland[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(9):2 423 –2 430.]

[29] 冯薇. 毛乌素沙地生物结皮光合固碳过程及对土壤碳排放的影响[D]. 北京林业大学,2014.[Feng Wei. Photosythetic Carbon Fixation of Biological Soil Crusts in MU US Desert and their Impact on Soil Carbon Emission[J]. Beijing Forestry University,2014.]

[30] 马文瑛,赵传燕,彭守璋,等. 黑河天涝池五种植被类型土壤呼吸速率动态特征及其影响因子[J]. 生态学报,2015,35(17):5

654 – 5 665.〔Ma Wenying, Zhao Chuanyan, Peng Shouzhang, et al. Variation in soil respiration rate and its influencing factors under five vegetation types in Tianlaoshi catchment in Heihe River〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17):5 654 – 5 665.〕

〔31〕车升国,郭胜利,张芳,等. 黄土区夏闲期土壤呼吸变化特征及其影响因素〔J〕. 土壤学报,2010,47(6):1 159 – 1 169.〔Che Shengguo, Guo Shengli, Zhang Fang, et al. Dynamics of soil respi – ration and its affecting factors in arid upland field during summerfallow season on the loess Plateu〔J〕. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6):1 159 – 1 169.〕

〔32〕Noy – Meir I. Structure and function of desert ecosystems〔J〕. Israel Journal of Botany, 1979, 28(1):1 – 19.

〔33〕Xu L, Baldocchi D D, Tang J. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature〔J〕. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(4):1 – 10.

〔34〕Luske B, Van der Kamp J. Carbon sequestration potential of reclaimed desert soils in Egypt〔J〕. Soil, 2009.

〔35〕Updegraff K, Bridgham S D, Pastor J, et al. Response of CO_2 and CH_4 emission from peatlands to warming and water table manipulation〔J〕. Ecology Application, 2011, 11(2):311 – 326.

〔36〕Xia J Y, Niu S L, Wan S Q. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing season in temperate steppe〔J〕. Global Change Biology, 2009, 15(6):1 544 – 1 556.

〔37〕Lin X, Zhang Z, Wang S, et al. Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan plateau〔J〕. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(7):792 – 802.

〔38〕Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon – cycle feedbacks to the climate system〔J〕. Science, 2002, 298(5 601):2 173 – 2 176.

Carbon Emission of Five Desert Shrubs Soil in West Ordos Plateau Region

WANG Shan1,2, DANG Xiaohong1, GAO Yong1,3, MENG Zhongju1,3,
WANG Zeyu, HU Shengrong4, PAN Xia1

(1 *College of Desert Science and Enginnering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot*, 010018, *P. R. Inner Mongolia*, *China*;
2 *Resource and Environmental EconomyCollege*, *Inner Mongolia University of Finance and Econormics*,
Hohhot, 010018, *P. R. Inner Mongolia*, *China*;
3. *Wind Erosion Key Laboratory of Central and Local Government*, *Hohhot*, *Inner Mongolia*, 010018, *P. R. China*;
4. *Inner Mongolia Environmental Assessment Center*, *Hohhot*, 010011, *P. R. China.*)

Abstract: For a more exact estimation of soil carbon emission in the five desert shrub forest and a more clear understanding of its impacting factors in west Ordos plateau, with the Automated Soil CO_2 Exchange Station, the soil CO_2 emission and the main environmental factors of the five desert shrub forests were studied. The results showed that the daily variation of soil carbon emission rate displayed a single peak curve with the maximum rate occurring between 11:30 – 13:30. The monthly soil carbon emission rate of the five desert shrubs in growing season (May to July) was much higher than that in the non – growing season (October), and the Helianthemum songaricum was the highest, which the maximum in growing season was higher for 0.76 – 1.67 times than the minimum in non – growing season. The annual average soil carbon emission rate was respectively that Ammopiptanthus mogolicus was 8090.63 $Kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, Zygophyllum xanthoxylum was 7287.40 $Kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, Tetraena mongolica was 7868.16 $Kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, Helianthemum songaricum was 8375.69 $Kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ and Reaumuria songarica was 7618.47 $Kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$. In the three future climate scenarios (low emission scenarios B1, intermediate emission scenarios A1B and high emission scenarios A2), the soil carbon emissions of five desert shrub forests soil are expected to be increased by 8.30% than the baseline scenario, in which the most temperature – sensitive was Zygophyllum xanthoxylum. There were differences for the response of soil carbon emission in different shrub forests to temperature change, but the differences were not significant. The research provides basic data and references for carbon balance estimation in arid and semiarid region in the northwest China under global environmental change.

Key words: Soil; desert shrub; carbon emission rate; climate scenarios; west Ordos